第 38 卷第 8 期
2018 年 4 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.38,No.8
Apr.,2018

DOI: 10.5846/stxb201704210718
栾金凯,刘登峰,黄强,冯九梁,林木,李国宝.近 17 年陕西榆林植被指数的时空变化及影响因素.生态学报,2018,38(8):2780-2790.
Luan J K, Liu D F, Huang Q, Feng J L, Lin M, Li G B.Analysis of the spatial-temporal change and impact factors of the vegetation index in Yulin, Shaanxi Province, in the last 17 years.Acta Ecologica Sinica,2018,38(8):2780-2790.

近 17 年陕西榆林植被指数的时空变化及影响因素

栾金凯[1],刘登峰[1,*],黄 强[1],冯九梁[2],林 木[3],李国宝[4]
1 西安理工大学水利水电学院,西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地,西安 710048
2 山西省水土保持生态环境建设中心,太原 030002
3 中央财经大学统计与数学学院,北京 100081
4 榆林市水利工作队,榆林 719000

摘要:植被指数是研究区域植被变化的重要手段。基于 MODIS/Terra NDVI 遥感影像数据,对陕西榆林市 2000—2016 年 8 月份 NDVI 进行像元尺度的时空变化及影响因素分析。结果表明,榆林有 96.44%的区域植被指数是增加的,增加值在 0—0.02/a 区域面积占榆林的 93.63%,呈显著增加趋势的面积占榆林的 80.72%。复直线回归分析显示,气象因素对植被生长、演化起到了促进作用,人类活动使得植被指数等级变得更加均匀。人类活动抑制植被生长演化的区域占榆林总面积的 45.04%,主要分布在榆林市最北部的府谷县、榆林市南部及西部的大部分区域;人类活动促使植被指数增加的区域占榆林总面积的 54.96%,说明有一半以上的区域,人类活动对植被生长起到了促进作用,这些地区的封山育林、退耕还林、退牧还草等措施的实施效果较好。
关键词:植被指数;时空变化;复直线回归;像元尺度;榆林

Analysis of the spatial-temporal change and impact factors of the vegetation index in Yulin, Shaanxi Province, in the last 17 years

LUAN Jinkai[1], LIU Dengfeng[1,*], HUANG Qiang[1], FENG Jiuliang[2], LIN Mu[3], LI Guobao[4]
1 *State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, School of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an* 710048, *China*
2 *Shanxi Provincal Water and Soil Conservation and Ecological Environment Construction Center, Taiyuan* 030002, *China*
3 *School of Statistics and Mathematics, Central University of Finance and Economics, Beijing* 100081, *China*
4 *Work Team of Hydraulic of Yulin City, Yulin* 719000, *China*

Abstract: Vegetation index is an important method to study regional vegetation changes. The present study is based on MODIS/Terra NDVI remote sensing data, and analyzes the spatial-temporal changes and impact factors of the NDVI in August from 2000 to 2016 at pixel scale in Yulin City of Shaanxi Province. The results showed that vegetation index increased in approximately 96.44% of the land area in the Yulin city, and the area with increasing NDVI between 0—0.02/a accounts for 93.63% of the land area of Yulin city. The area with significant increasing trend accounts for 80.72%. The complex linear regression analysis showed that meteorological factors play a positive role in the growth and evolution of vegetation, and human activities also make the vegetation index to become more uniform. The area where the human activities restrain the growth and evolution of the vegetation covers 45.04% of area of Yulin. It is mainly distributed in Fugu County, which is located to the north of Yulin and most areas of the southern and western parts of Yulin. The area where human activities promote the increase of the vegetation index accounted for 54.96% of area of Yulin, which indicated that in

基金项目:陕西省自然科学基础研究计划(2016JQ5105);榆林市科技计划项目(2016-21);国家自然科学基金项目(51609270);教育部博士学科点基金(20136118120021);西安理工大学水利水电学院科研项目(2016ZZKT-15)

收稿日期:2017-04-21; **网络出版日期**:2018-01-08

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liudf@ xaut.edu.cn

more than half of the region, human activities have played a positive role in the growth of vegetation. In these areas, the effects of forest conservation, returning farmland to forests, and returning pasturage to natural grassland are greater than those in other areas.

Key Words: vegetation index; spatial-temporal change; complex liner regression; pixel scale; Yulin

地表植被处于岩石圈最活跃的一层,是岩石圈与大气圈、土壤圈、生物圈、水圈长期相互作用的产物,在地球生态系统平衡、气候变化和水循环中起着协调的作用[1-2]。同时,植被是全球土地覆盖最重要、最敏感的构成要素之一,可在较短时间内反映气候变化和人类活动的影响[3]。土地沙漠化敏感区域属于全国防风固沙生态功能区,对国家生态安全具有重要作用,关系着区域人地矛盾的解决[4]。榆林位于毛乌素沙漠与陕北黄土高原交界地带,属于农牧交错区,生态环境脆弱且变化敏感,是研究沙漠的热点和重点区域[5-6]。

植被指数时空变化影响因素的研究大多以相关分析为基础。Gao 等[7]认为在中国东部,气温和降水同时影响植被变化,但气温起主导作用,同时得出 NDVI 对气温和降水的变化有滞后期,分别为 10d 和 30d。也有些学者分析后发现 NDVI 对降水及温度的响应具有明显的空间差异与滞后效应[8-9]。Piao 等[10]应用相关分析方法分析了草地 NDVI 气候变化响应。夏照华[11]分析了整个中国最近二十多年来 NDVI 的时空分布规律,以及 NDVI 与降水、温度之间的关系,尝试区分出了 NDVI 影响因子中的气候因子与人类活动因子。Fabricante 等[12]认为 NDVI 值的变化与前几个月的水总量相关更大。Ding 等[13]利用 NDVI 得出青藏高原北坡的生长期只有 3 个月(7—9 月),生长期的降水与 NDVI 的相关性极好。李登科等[14]利用简单相关系数分析,分析了长城沿线各区县年均 NDVI 与降水和气温的相关关系。杨英莲[15]分析了青海省不同草地类型 NDVI 的季节变化和年际间的变化特征,又将 22 年来草地平均 NDVI、气温和降水进行了趋势分析和相关分析。李丽娜[16]在空间中选取足够多的点对陕西省生长季 NDVI 与温度、降水进行相关分析,发现不同区域气候对植被影响有差异,植被对气候的敏感度也有差异。朱文彬等[17]通过逐像元分析发现柴达木盆地植被覆盖的影响因素主要包括降水、地表地下水文条件、海拔高度和人类活动 4 个方面。Zhao 等[18]对 1982—2003 年新疆 NDVI 进行研究发现,区域 NDVI 的增加与降水量和潜在蒸散量(ET) 的增加有关。徐浩杰等[19]利用简单相关系数分析,发现影响祁连山植被生长的主要因子是气温和降水,局部地区人类活动也是影响植被生长的关键因子。张清雨等[20]对内蒙古自治区的 NDVI 进行研究和分析,发现整个自治区大部分区域 NDVI 与年降水量呈显著相关,同时还发现近 30 年来人类活动对植被 NDVI 的影响程度正在逐渐增强。张智韬等[21]对影响大豆 NDVI 的气象因素进行多元线性回归分析,从而实现对 NDVI 的预测。孙庆龄等[22]应用逐像元的气候因子与生长季累计 NDVI 的相关性分析的方法,分析出影响三江源地区植被的主要气候因素。成方妍等[23]分析气象因子与 NDVI 相关性发现气象因子与区域内不同土地覆被类型 NDVI 相关性不显著。

近年来也有一些有关榆林及周边地区植被指数的研究,李登科等[14]使用 1981—2003 年 23a 长序列资料对陕北长城沿线风沙区植被指数利用趋势线分析方法,分析了区域平均 NDVI 的变化趋势,发现陕北长城沿线风沙区植被覆盖状况尽管有波动起伏,但整体在持续转好,年均 NDVI 增加了 10.62%。并利用简单相关系数的方法,对长城沿线每个县分析了年、季平均 NDVI 与年份的相关系数和斜率。刘静等[24]利用 NDVI 和像元分解模型,建立了毛乌素沙漠植被覆盖度遥感定量模型,并对 1990 年和 2007 年 2 个时期植被覆盖度进行了等级划分,利用转移矩阵的方法分析植被覆盖度的变化趋势。周淑琴[4]利用 SPOT NDVI 数据,研究了不同等级植被间的变化过程及 NDVI 空间异质性。周淑琴等[25]应用空间统计学和经典统计学方法,研究了毛乌素沙漠 1998—2013 年的植被空间自相关分布模式和发展趋势及气象因素的影响。王静璞等[26]利用偏相关分析方法,分析毛乌素沙漠植被年平均物候与气温和降水的关系。这些研究采用的植被指数的时间序列、空间尺度、研究方法各不相同。郑亚云[27]利用 2000—2014 年 MODIS 数据,采用波段重运算、最大化合成、时间序列分析、线性回归分析方法研究榆林不同尺度 NDVI 的变化差异,同时选取空间上的一些点对高程、坡度及

气候因子与 NDVI 的关系做定量研究。刘登峰等[28]基于 MODIS NDVI 遥感数据分析了 2000—2013 年毛乌素沙漠南部植被的变化状况,总结出 NDVI 年均值呈现出上升趋势,年增长率为 2.69×10^{-3}/a,还分析了 NDVI 逐年的级别转移状况。

目前对 NDVI 时空变化分析,有些是基于面平均分析的,有些是利用一元线性回归趋势线方法,基于像元尺度进行分析。目前对 NDVI 影响因素的研究涉及以下 3 个方面:对研究区域植被指数取面平均值与降水、气温等气象要素进行简单相关分析或回归分析;在像元尺度的简单相关分析;在研究区域选取气象站点周围的 NDVI 值与气象因子进行简单相关分析和多元回归分析。但是尚未有研究对某一特定区域进行 NDVI 像元尺度的多元回归分析,并定量区分气象因素与人类活动对植被指数的影响。进行 NDVI 像元尺度的分析,可以准确分析研究区域内每个地点的时空变化及气象因素对小范围的影响,空间连续性和异质性能够更好的体现和分析;利用多元回归分析,可以同时考虑多个气象因素对植被指数的影响,并能准确分析气象因素对植被指数的影响及贡献,实现气象因素与人类活动对植被指数影响的定量区分,比较准确的基于像元尺度预测未来植被覆盖状况。所以,本研究将二者结合起来,对陕西榆林植被指数进行分析和研究。

鉴于像元尺度研究的重要性,本文以陕西省榆林市为研究区域,对 2000—2016 年的 17 年归一化差分植被指数在像元尺度进行时空变化分析,然后基于像元尺度利用复直线回归分析方法,对植被动态变化的人为因素与气象因素进行定量分析,并对 NDVI 进行预测。

1 研究区域概况

榆林市位于陕西省最北部,经纬度范围是 107°28′E—111°15′E,36°57′N—39°35′N。东临黄河与山西省相望,西接宁夏回族自治区、甘肃省,北邻内蒙古自治区,南接陕西省的延安市。2015 年底,全市常住人口 340.11 万人。地域东西长 385km,南北宽 263km,总土地面积 43578km²[29-30]。

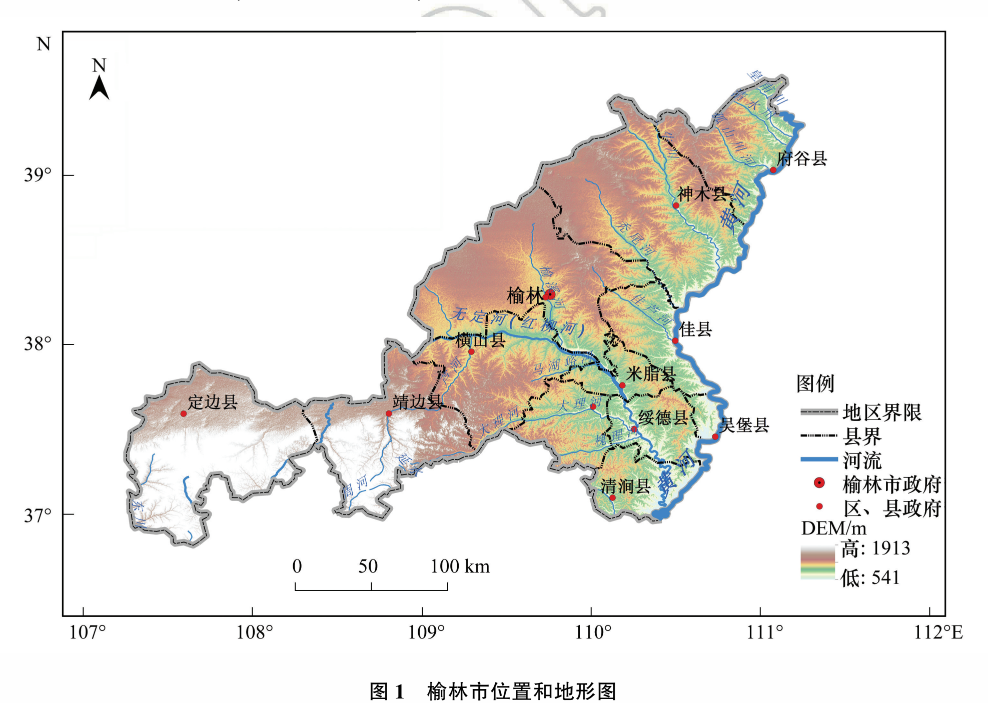


图 1 榆林市位置和地形图

Fig.1 Location and topographic map of Yulin City

榆林全境地势呈西北高、东南低,平均海拔为 1300m,地貌大体以长城为界,北部为风沙草滩区,占总面积的 42%,南部为黄土丘陵沟壑区,占总面积的 58%。榆林我国东部季风气候和西北干旱大陆性气候的过渡地带,也是毛乌素沙漠南缘与陕北黄土高原的过渡地带,这也决定了榆林生态环境的脆弱性。榆林属暖温带半湿润气候向半干旱气候的过渡区,属于温带大陆性气候;从东南到西北随着距海距离的增加,植被表现出明显

的地带性:温带落叶林—草原—荒漠草原—荒漠的过渡和演替。

2　数据来源与处理

本文采用来自 MODIS/Terra 网站提供的 NDVI 遥感数据,数据集全称为 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V005,简称 MOD13Q1。MOD13Q1 数据是 16d 合成,空间分辨率为 250m,数据文件包含了 12 个字段的数据,NDVI 的有效值在-1 到 1 之间[6]。

本研究中首先对下载的影像应用 MRT(MODIS Reprojection Tool)软件进行批量裁剪、投影等操作,由于本研究只对 8 月份 NDVI 影像进行分析,MOD13Q1 数据 8 月份有 2 幅影像,得到后的影像进行最大化合成处理。这样每年得到一幅影像,从 2000—2016 年共 17 幅影像。

3　研究方法

3.1　一元线性回归趋势线分析

一元线性回归趋势线分析是对一组随时间而变化的变量进行回归分析的方法。该方法能够分析研究区域每个像元的变化趋势,以此来模拟植被的绿度变化率(Greenness Rate of Change,GRC),GRC 被定义为某时间段内的季节合成归一化植被指数(Seasonally Integrated Normalized Difference Vegetation Index,SINDVI)年际变化的线性回归方程的斜率[31-32]。本文通过每个像元 17 年的 NDVI,可以模拟该像元的 NDVI 在这 17 年间的变化趋势,并估计变化幅度,回归直线斜率(slope)采用最小二乘法求得,其计算公式如下:

$$\text{slope} = \frac{17 \times \sum_{i=1}^{17} i \times \text{NDVI}_i - \left(\sum_{i=1}^{17} i\right)\left(\sum_{i=1}^{17} \text{NDVI}_i\right)}{17 \times \sum_{i=1}^{17} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{17} i\right)^2} \tag{1}$$

式中:i 为 1—17 年中的第 i 年;NDVI_i 为第 i 年的 NDVI 值; slope 为趋势线的斜率。slope>0 时,说明 NDVI 在这 17 年间呈现增加的趋势;slope=0 时,说明 NDVI 没有变化;slope<0 时,NDVI 呈现减少的趋势。

3.2　相关分析检验

自然界中的许多现象之间存在着一定的联系,它们之间既不是确定的函数关系,也不是完全没有关系。相关分析就是研究两个或多个随机变量之间的联系[33]。其计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} [(x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{Y})^2}} \tag{2}$$

式中:n 为样本数;$\bar{X}$ 为变量 x 的均值;$\bar{Y}$ 为变量 y 的均值;r_{xy} 为变量 x 和变量 y 的相关系数。

研究对象是 NDVI 序列和时间序列,所得到的结果为每一像元对应的 NDVI 值与年份的回归系数,得到的相关系数 r_{xy} 可以用来检验植被生长状况的变化趋势。如果相关系数为正值,表明植被覆盖度呈现增加的趋势;反之就表示该区域植被覆盖度呈现降低的趋势。如果 r_{xy} 值通过了 0.05 的显著性水平($P<0.05$)检验,说明 NDVI 具有显著的变化趋势。

3.3　复直线回归分析

本文是进行 NDVI 与温度、降水之间的复直线回归分析,回归方程为:

$$z = a + bx + cy \tag{3}$$

参数计算公式为:

$$b = \frac{r_{xz} - r_{xy}r_{yz}}{1 - r_{xy}^2} \cdot \frac{\sigma_z}{\sigma_x} \tag{4}$$

$$c = \frac{r_{yz} - r_{xy}r_{xz}}{1 - r_{xy}{}^2} \cdot \frac{\sigma_z}{\sigma_y} \quad (5)$$

$$a = \bar{z} - b\bar{x} - c\bar{y} \quad (6)$$

式中，$\bar{x}$、$\bar{y}$、$\bar{z}$为x、y、z系列的均值；σ_x、σ_y、σ_z为系列的均方差；r_{xy}、r_{xz}、r_{yz}是x和y、x和z、y和z的相关系数。

NDVI 模拟残差计算公式：

$$\text{residual} = \text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{P}} \quad (7)$$

式中，residual 为 NDVI 复直线回归方程残差；NDVI 为 NDVI 时间序列数据集；NDVI_P是根据复直线回归模型预测的 NDVI 值。

4 结果分析

4.1 NDVI 的时空变化特征

通过一元线性回归趋势线分析得到 2000—2016 年 8 月份逐像元 NDVI 空间分布坡度图(图 2)和不同级别 slope 面积(表 1)，图 2 中绝大部分区域呈现绿色，说明大部分区域植被指数是增加的，增加率在 0—0.03/a 占多数；有些区域达到了 0.04 以上，最大值达到了 0.044；植被指数减小的区域主要零星分布在榆林市的西部及西北部，这些区域是毛乌素沙漠的南缘，主要涉及到定边县、靖边县、横山区和榆阳区。最小值为-0.054/a，平均值为 0.0102/a，标准差为 0.0058。

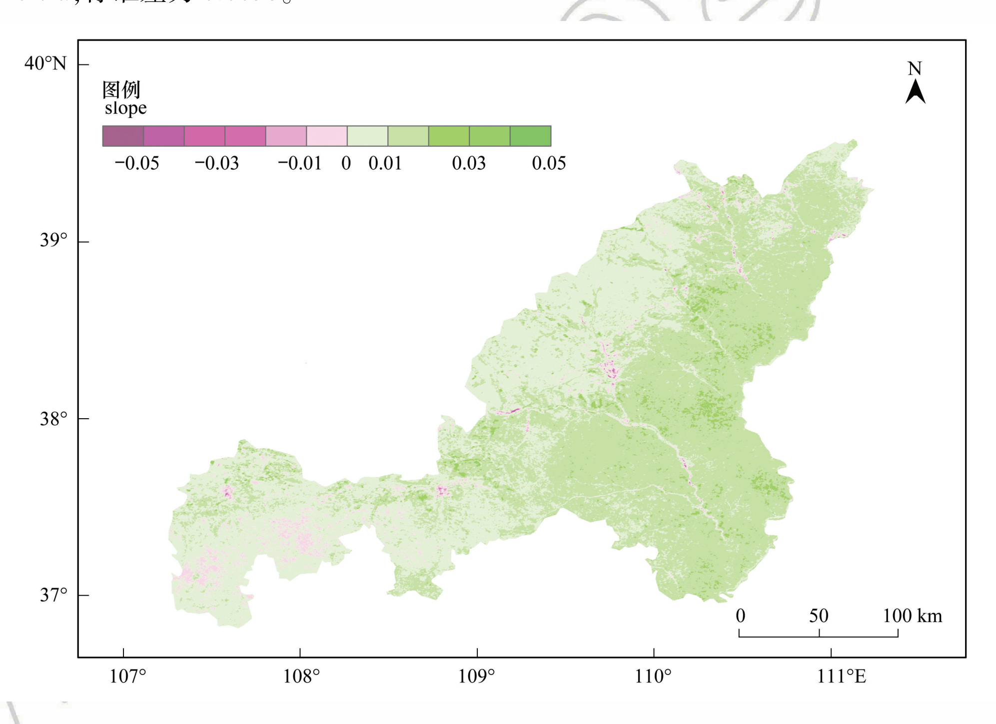


图 2 2000—2016 年榆林 NDVI 一元线性回归坡度分布图

Fig.2 Distribution of NDVI one-dimensional linear regression slope in Yulin from 2000 to 2016

表 1 为榆林植被指数一元线性回归分析变化表，NDVI 减小的面积为 1537.44km^2，仅占榆林总面积的 3.57%，其中 slope 在 0 和-0.1 之间的区域为 1452.81km^2，占榆林市总面积的 3.37%；NDVI 增加的面积为 41609.76km^2，占榆林总面积的 96.44%，其中 slope 在 0—0.02/a 之间的区域占 93.63%。说明近些年来榆林 NDVI 呈现增加的趋势，且增加值基本都在 0 与 0.02/a 之间，榆林植被覆盖度逐渐增加。

4.2 NDVI 变化程度评价

为了定量的分析研究区域 NDVI 的变化程度，对逐年的 NDVI 影像和时间序列进行相关系数分析，得到每

一像元的 NDVI 值与年份的回归系数,即相关系数 r_{xy},将该系数进行 0.05 的显著性水平检验,得到的变化趋势分布图见图 3。

表 1　2000—2016 年榆林 NDVI 一元线性回归分析变化表

Table 1　NDVI variance linear regression analysis of changes in the table in Yulin from 2000 to 2016

NDVI 变化趋势/a NDVI variance tread	面积 Area/km²	比例 Proportion/%	NDVI 变化趋势/a NDVI variance tread	面积 Area/km²	比例 Proportion/%
slope<-0.05	0.32	0.00	0≤slope<0.01	18349.61	42.53
-0.05≤slope<-0.04	0.97	0.00	0.01≤slope<0.02	22046.36	51.10
-0.04≤slope<-0.03	2.58	0.01	0.02≤slope<0.03	1194.52	2.77
-0.03≤slope<-0.02	12.13	0.03	0.03≤slope<0.04	18.57	0.04
-0.02≤slope<-0.01	68.64	0.16	slope≥0.04	0.70	0.00
-0.01≤slope<0	1452.81	3.37			

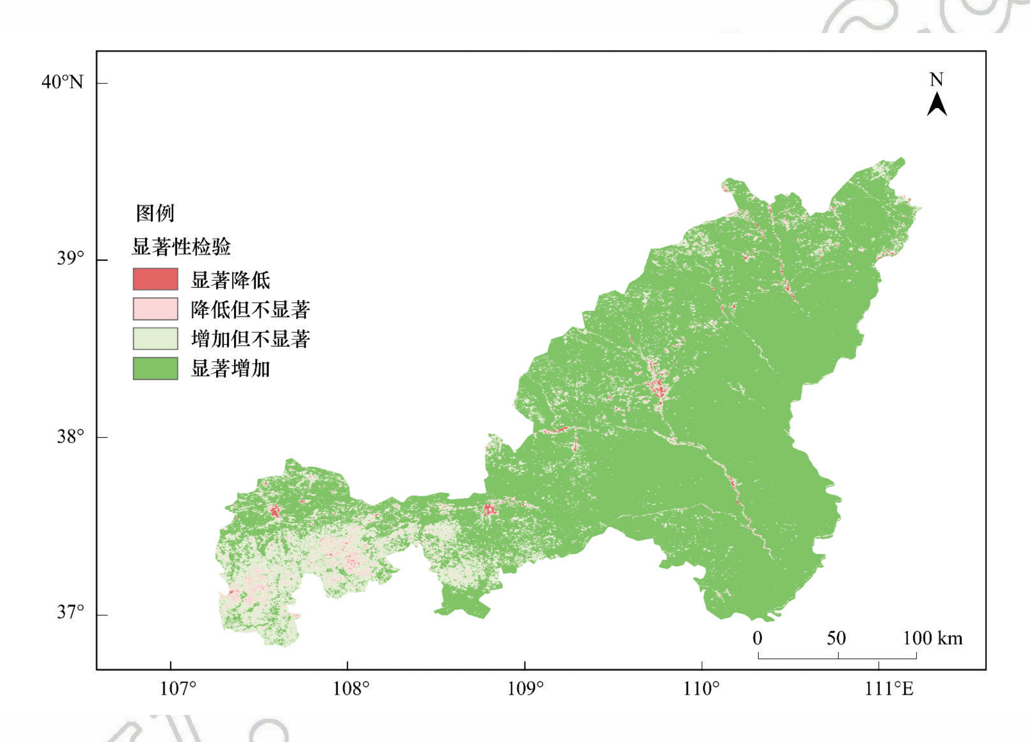


图 3　2000—2016 年 NDVI 动态变化显著性水平检验图

Fig.3　The significance test of NDVI dynamic change from 2000 to 2016

如果 r_{xy} 值大于 0.05 的显著性水平(P<0.05)$r_{0.05}$=0.482,则认为 NDVI 增加或减小趋势显著。图 3 显示,绝大多数区域通过了 0.05 的显著性水平检验,显著增加的区域占研究区域总面积的 80.72%,增加但不显著的区域占 15.71%,显著降低的区域仅占 0.43%,零星分布在西北部毛乌素沙漠处,降低但不显著的区域占 3.14%,零星分布在西部的定边县和靖边县。所以,榆林的 NDVI 近些年来呈现显著增加的趋势,呈显著增加趋势的面积占 80.72%。

4.3　2000 年与 2016 年比较分析

将榆林 2016 年 8 月份 NDVI 影像减去 2000 年 8 月份 NDVI 影像,得到两个年份的差值分布图(图 4),并统计出不同差值范围所占的面积(表 2)。2016 年与 2000 年相比,大部分区域 NDVI 增加值在 0—0.4 之间。

2016 年 NDVI 值比 2000 年小的区域仅占研究区域的 3.14%,为 1354.12km²;其中小于 0.2 的仅有42.45 km²,占总面积的 0.10%;在 0.2 与 0 之间的为 1311.67km²,占榆林总面积的 3.04%。2016 年 NDVI 值比 2000 年增加的区域占研究区域的 96.86%,达到了 41793.09km²;其中在 0 与 0.2 之间的区域是 19841.28km²,占研

究区域总面积的 45.99%；在 0.2 与 0.4 之间的有 21505.85km^2，占总面积的 49.84%；在 0.4 和 0.6 之间的为 438.71km^2，仅占 1.02%；大于 0.6 的区域仅有 7.25km^2，仅占总面积的 0.02%。说明 2016 年与 2000 年相比，榆林市绝大部分区域植被指数都增加了，且增加幅度基本在 0—0.4 之间。

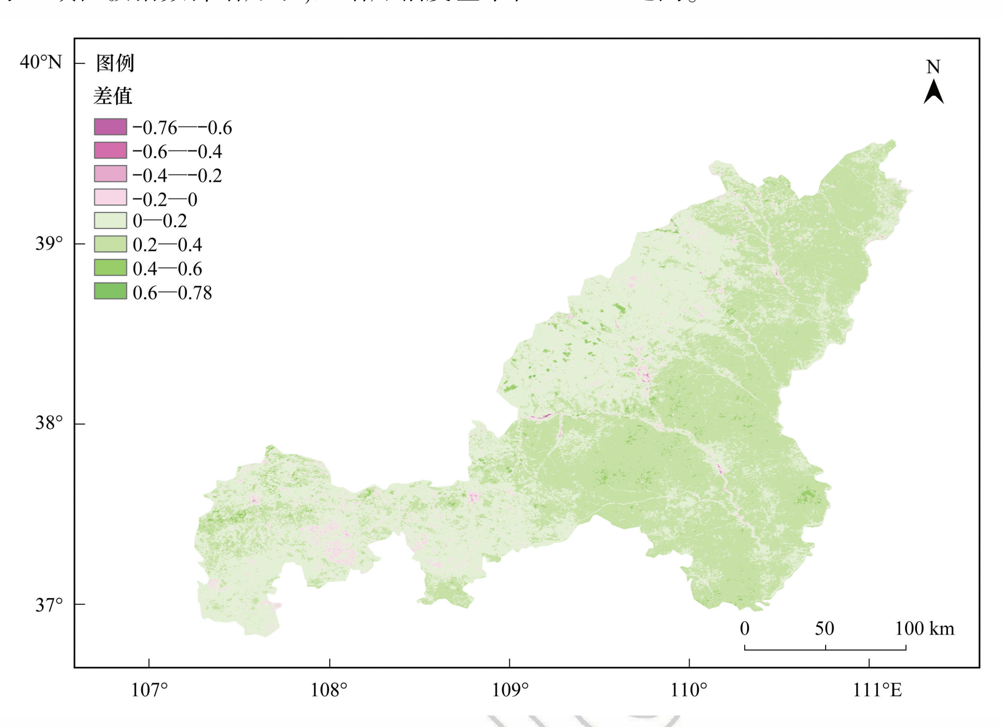


图 4 2016 年与 2000 年 8 月份 NDVI 差值分布图

Fig.4 NDVI difference distribution in August between 2016 and 2000

表 2 2016 年与 2000 年榆林 8 月份 NDVI 差值分布表

Table 2 NDVI difference distribution table in in August between 2016 and 2000

NDVI 差值 NDVI difference	面积 Area/km^2	比例 Proportion/%	NDVI 差值 NDVI difference	面积 Area/km^2	比例 Proportion/%
NDVI<-0.6	1.45	0.00	0≤NDVI<0.2	19841.28	45.99
-0.6≤NDVI<-0.4	4.13	0.01	0.2≤NDVI<0.4	21505.85	49.84
-0.4≤NDVI<-0.2	36.87	0.09	0.4≤NDVI<0.6	438.71	1.02
-0.2≤NDVI<0	1311.67	3.04	NDVI≥0.6	7.25	0.02

为了分析 2000—2016 年不同级别植被指数的变化情况，参照周淑琴[4]的研究，将榆林植被序列分为 6 个等级：1 级（NDVI≤0.2）无植被区、2 级（0.2<NDVI≤0.3）极低植被覆盖区、3 级（0.3<NDVI≤0.4）低植被覆盖区、4 级（0.4<NDVI≤0.5）中等植被覆盖区、5 级（0.5<NDVI≤0.6）高植被覆盖区、6 级（NDVI>0.6）密集植被覆盖区。做出 2000 年植被指数等级向 2016 年植被指数等级的转移矩阵（表 3）。

2000—2016 年榆林市植被等级面积转移矩阵表（表 3）中，对角线上的数据是未发生转变的植被，对角线右上方是正向转变的植被等级面积，左下方是逆向转变的植被等级面积。显然右上方的面积明显大于左下方的面积，这和作图分析得到的结果相符合。

4.4 植被动态变化气象因素与人为因素的定量分析

为了逐像元定量分析气象因素和人类活动对植被的影响，另外由于气象因子存在空间不均匀性，选取榆林区域内及其周边的 13 个气象站点资料，采用空间插值的方法来获得每一个像元的降水和气温数据。选用了榆林、定边、靖边、横山、绥德、神木、吴旗、延安、兴县、离石、河曲、盐池、东胜共 13 个站点 2000—2015 年的降水和气温资料。由于植被指数与温度、降水之间存在一定的滞后关系，所以为了准确分析 NDVI 与温度和

降水之间的定量关系,必须考虑这种滞后效应。在选取月降水和气温数据时,利用泰森多边形方法将点降水和气温分配到面上,分别求出榆林 NDVI 与 6 月、7 月、8 月、6 月和 7 月平均值、7 月和 8 月平均值、6 月 7 月 8 月这 3 个月平均值的相关系数,并进行了 t 分布检验,发现榆林 NDVI 与 7 月份平均气温和 7 月份总降水量 t 值最大,均通过了 $\alpha = 0.05$ 的置信度检验。所以本文选择了 2000—2015 年 13 个站点 7 月份平均气温和 7 月份总降水量作为气温和降水的研究序列。

表 3　2000—2016 年榆林市植被等级面积转移矩阵表/km²

Table 3　Vegetation grade area transfer matrix table in Yulin from 2000 to 2016

	2016 年							
	等级 Grades	1 级 Level 1	2 级 Level 2	3 级 Level 3	4 级 Level 4	5 级 Level 5	6 级 Level 6	总计 Total
2000 年	1 级	155.47	1677.96	1344.72	726.12	365.87	80.89	4351.03
	2 级	52.28	1278.88	3511.10	3833.10	5121.33	1905.58	15702.27
	3 级	9.82	140.68	1216.95	2980.22	5800.50	5830.18	15978.36
	4 级	1.99	20.26	178.19	738.60	1615.96	2933.65	5488.65
	5 级	1.77	5.98	20.62	70.70	273.75	781.89	1154.72
	6 级	2.52	3.43	6.80	10.24	38.47	406.63	468.10
	总计 Total	223.85	3127.19	6278.39	8358.97	13215.88	11938.83	43143.12

把 NDVI 的 2000—2015 年时间序列和所采用的气温和降水数据进行复直线回归分析,求出 a、b、c 参数,再计算出 NDVI 与温度、降水之间的回归方程,最后利用温度和降水序列得出 NDVI 的预测值。该预测值是气候因素对 NDVI 的贡献部分,用原始的 NDVI 减去 NDVI 的预测值即可得到残差,该残差即为人为因素对 NDVI 的影响和其他不确定因素的影响。

图 5 是将 2015 年榆林面气温和降水数据进行复直线回归分析得到的 NDVI 值,该图东部和东南部区域 NDVI 多在 0.4 以上,西部和西北部的风沙草原区 NDVI 值较小,说明东部和东南部的森林草原区自然条件(地形、地貌、气候、水文、土壤)更适合于植被的生长,西部和西北部由于位于毛乌素沙漠的边缘,自然条件恶劣,植被自我更新和自我生长能力较差。表 4 是与图 5 相对应的不同 NDVI 贡献值的面积及比例。99%以上的区域 NDVI 为正值,其中 0.3≤NDVI<0.4 的面积为 9220.72km², 占到总面积的 21.46%;0.4≤NDVI<0.5 的面积为 18612.14km², 占总面积的 43.32%;0.5≤NDVI<0.6 的面积为 8763.92km², 占总面积的 20.40%。三者总和占到了总面积的 85%以上,说明在没有人类活动影响下,现阶段榆林的 NDVI 一般在 0.3—0.6 之间。而 2015 年的实际观测值 0.3≤NDVI<0.4 占到总面积的 26.89%;0.4≤NDVI<0.5 占到总面积的 31.10%;0.5≤NDVI<0.6 占到总面积的 22.90%;0.2≤NDVI<0.3 的比例为 12.22%;0.6≤NDVI<0.7 的比例为 5.32%。实际观测值与预测值的主要差别为介于 0.4 和 0.5 之间的区域面积减小了,减小了 12.22%,而 0.6 和 0.7 之间的区域增加了,增加了 3.60%。同时还可以看出人类活动使得植被指数变得更加均匀,中等植被覆盖区面积减少了,而密集植被覆盖区面积增加了,这是近年来榆林市开展封山育林、退耕还林、退牧还草等各项植被恢复和保护措施的结果。

表 4　气象因素(气温和降水)对榆林市 2015 年 8 月 NDVI 贡献值分布表

Table 4　Meteorological factors (temperature and precipitation) to NDVI contribution distribution table for Yulin City in August 2015

NDVI 贡献值 NDVI contribution	面积 Area/km²	比例 Proportion/%	NDVI 贡献值 NDVI contribution	面积 Area/km²	比例 Proportion/%
NDVI<0	21.73	0.05	0.4≤NDVI<0.5	18612.14	43.32
0≤NDVI<0.1	27.37	0.06	0.5≤NDVI<0.6	8763.92	20.40
0.1≤NDVI<0.2	449.98	1.05	0.6≤NDVI<0.7	737.84	1.72
0.2≤NDVI<0.3	5030.20	11.71	0.7≤NDVI<0.8	104.75	0.23
0.3≤NDVI<0.4	9220.72	21.46	NDVI≥0.8	0.06	0.00

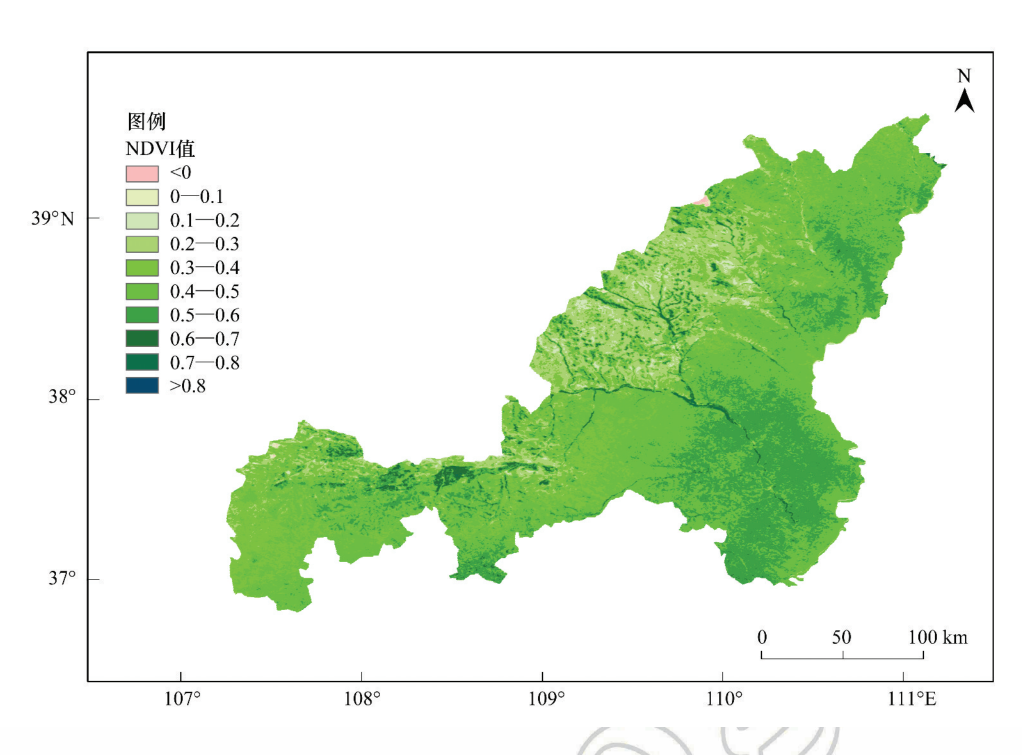


图 5 气象因素(气温和降水)对榆林市 2015 年 8 月 NDVI 贡献分布图

Fig.5 Meteorological factors (temperature and precipitation) to NDVI contribution distribution for Yulin City in August 2015

为了定量化分析人类活动对植被的影响,根据复直线回归分析,用原始观测的 NDVI 减去 NDVI 的预测值,即计算出了残差,残差可以认为是人为因素对 NDVI 所贡献的部分(图 6 和表 5)。人类活动对植被指数有消减的区域占榆林总面积的 45.04%,主要分布在榆林最北部的府谷县、榆林南部、榆林西部等区域(图 6)。人类活动对植被指数有提高的区域占榆林总面积的 54.96%,但有 46.64%的区域的贡献值介于 0 和 0.1 之间,说明 2015 年这些区域的人类活动使得植被指数增加了,植被覆盖度增加。2015 年榆林市统计年鉴[34]显示,在植被指数增加的区域森林覆盖率、第一产业增加值、年末常用耕地面积比例、水保治理面积、旱涝保收面积都明显大于植被指数降低的地区。榆林市从 1999 年开始积极响应国家号召,逐渐开展退耕还林、荒山荒地造林、封山育林等工程。这些退耕还林还草的生态工程建设促进了植被的恢复,但是这些措施在不同地区的实施规模和实施效果是存在差异的。而 NDVI 的变化直接反映了植被恢复的效果,所以此方法可以作为监察封山育林、退耕还林、退牧还草的政策落实和实施效果的参考,鉴于统计回归分析结果存在的误差,在应用中应予以注意。另外在现阶段人类活动变化幅度不大的情况下,可以根据未来的气温和降水预测未来植被状况的理论值。

表 5 人类活动对榆林 2015 年 8 月 NDVI 的贡献值分布表

Table 5 Human activity to NDVI contribution distribution table for Yulin City in August 2015

NDVI 贡献值 NDVI contribution	面积 Area/km^2	比例 Proportion/%	NDVI 贡献值 NDVI contribution	面积 Area/km^2	比例 Proportion/%
NDVI<0	19349.17	45.04	0.3≤NDVI<0.4	56.99	0.13
0≤NDVI<0.1	20036.08	46.64	0.4≤NDVI<0.5	17.07	0.04
0.1≤NDVI<0.2	3285.51	7.65	NDVI≥0.5	1.72	0.00
0.2≤NDVI<0.3	210.74	0.49			

5 结论

本文利用 MODIS/Terra NDVI 时间序列数据对 2000—2016 年陕西榆林生长季(8 月份)植被指数进行时

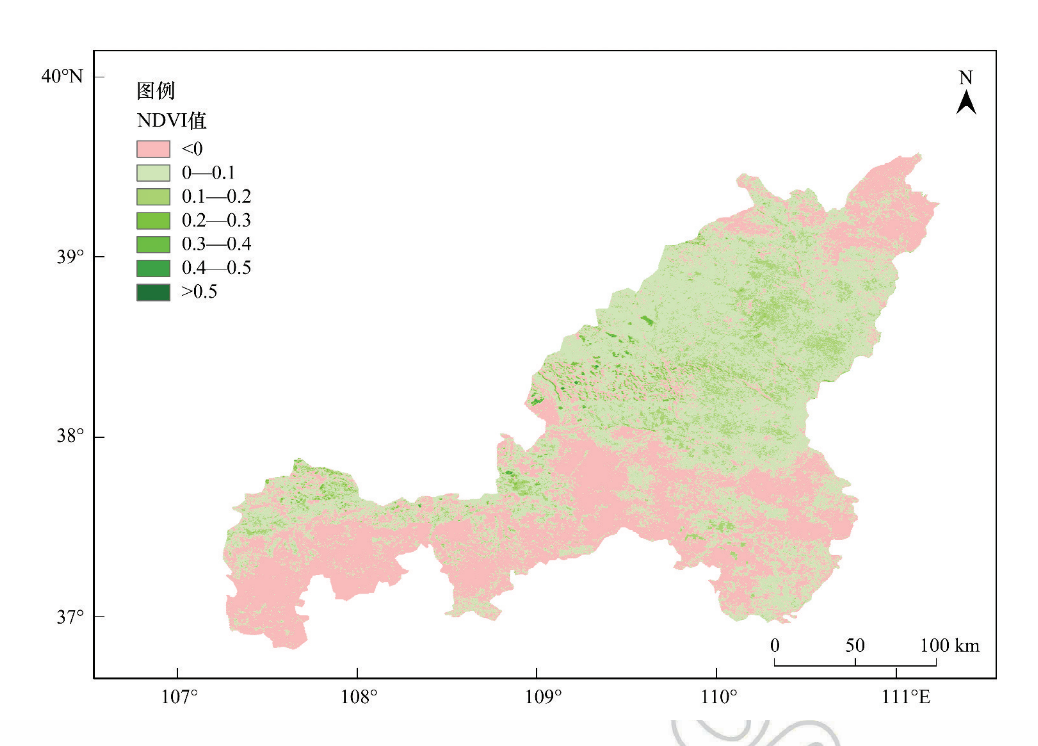


图 6　人类活动对榆林 2015 年 8 月 NDVI 贡献分布图

Fig.6　Human activity to NDVI contribution distribution for Yulin City in August 2015

空变化特征及影响因素分析,主要得出以下结论:

(1) 对 2000—2016 年榆林 8 月份 NDVI 影像进行时空变化分析表明,榆林有 96.44%的区域植被指数是增加的,增加率在 0—0.02/a 之间的区域占榆林的 93.63%。显著降低的区域仅占 0.43%,零星分布在西北部毛乌素沙漠处,呈显著增加趋势的面积占到 80.72%。2016 年与 2000 年相比,榆林绝大部分区域植被指数都增加了,且增加幅度基本在 0—0.4 之间。

(2) 为了逐像元定量分析气象因素和人类活动对植被的影响,复直线回归分析显示,气象因素对植被生长演化起到了促进作用,人类活动使得植被指数等级变得更加均匀。气象因素对植被指数的贡献东部和东南部区域的森林化草原区 NDVI 多在 0.4 以上,西部和西北部的风沙草原区 NDVI 的贡献较小,说明东部和东南部区域自然条件(地形、地貌、气候、水文、土壤)更适合于植被的生长,西部和西北部由于位于毛乌素沙漠的边缘,自然条件恶劣,植被自我更新和自我生长能力较差。

(3) 人类活动表现为抑制植被生长演化的区域占榆林总面积的 45.04%,主要分布在榆林市最北部的府谷县、榆林南部、榆林西部等区域。人类活动对植被指数有提高的区域占榆林总面积的 54.96%,说明有一半多以上的区域,人类活动对植被生长起到了促进作用,这些地区的封山育林、退耕还林、退牧还草等措施的实施效果较好。在现阶段人类活动变化幅度不大的情况下,可以根据未来的气温和降水预测未来植被状况的理论值,为区域生态修复和环境保护提供参考。

参考文献(References):

[1] 孙红雨, 王常耀, 牛铮, 布和敖斯尔, 李兵. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据. 遥感学报, 1998, 2(3): 204-210.

[2] 毛德华, 王宗明, 罗玲, 杨桄. 基于 MODIS 和 AVHRR 数据源的东北地区植被 NDVI 变化及其与气温和降水间的相关分析. 遥感技术与应用, 2012, 27(1): 77-85.

[3] 张月丛, 赵志强, 李双成, 孟宪锋. 基于 SPOT NDVI 的华北北部地表植被覆盖变化趋势. 地理研究, 2008, 27(4): 745-754.

[4] 周淑琴. 基于 RS 和 GIS 的毛乌素沙地东南缘沙地治理监测与评价[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2015.

[5] 何彤惠, 王乃昂. 毛乌素沙地历史时期环境变化研究. 北京: 人民出版社, 2010: 15-19.

[6] 刘登峰, 黄强, 林木. 基于遥感的塔里木河植被变化规律研究. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 32-36.
[7] Gao Z Q, Dennis O. The temporal and spatial relationship between NDVI and climatological parameters in Colorado. Journal of Geographical Sciences, 2001, 11(4): 411-419.
[8] Nezlin N P, Kostianly A C, Li B L. Inter-annual variability and interaction of remote-sensed vegetation index and atmospheric precipitation in the Aral Sea region. Journal of Arid Environments, 2005, 62(4): 677-700.
[9] Wang J, Rich P M, Price K P. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the Central Great Plains, USA. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(11): 2345-2364.
[10] Piao S L, Mohammat A, Fang J Y, Cai Q, Feng J M. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China. Global Environmental Change, 2006, 16(4): 340-348.
[11] 夏照华. 基于 NDVI 时间序列的植被动态变化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
[12] Fabricante I, Oesterheld M, Paruelo J M. Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across Northern Patagonia. Journal of Arid Environments, 2009, 73(8): 745-753.
[13] Ding M J, Zhang Y L, Liu L S, Zhang W, Wang Z F, Bai W Q. The relationship between NDVI and precipitation on the Tibetan Plateau. Journal of Geographical Sciences, 2007, 17(3): 259-268.
[14] 李登科, 郭铌, 何慧娟. 陕北长城沿线风沙区植被指数变化及其与气候的关系. 生态学报, 2007, 27(11): 4620-4629.
[15] 杨英莲. 青海省天然草地 NDVI 的时空化与气温和降水的关系分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
[16] 李丽娜. 基于陕西省温度和降水的空间变化及其与 NDVI 的相关性研究[D]. 西安: 西北大学, 2009.
[17] 朱文彬, 吕爱锋, 贾绍凤. 基于 NDVI 的柴达木盆地植被空间分异规律及影响因素. 干旱区研究, 2010, 27(5): 691-698.
[18] Zhao X, Tan K, Zhao S, Fang J. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the northwestern China. Journal of Arid Environments, 2011, 75(10): 946-952.
[19] 徐浩杰, 杨太保, 曾彪. 2000-2010 年祁连山植被 MODIS NDVI 的时空变化及影响因素. 干旱区资源与环境, 2012, 26(11): 87-91.
[20] 张清雨, 赵东升, 吴绍洪, 戴尔阜. 基于生态分区的内蒙古地区植被覆盖变化及其影响因素研究. 地理科学, 2013, 33(5): 594-601.
[21] 张智韬, 兰玉彬, 郑永军, 陈立平, 宋鹏. 影响大豆 NDVI 的气象因素多元回归分析. 农业工程学报, 2015, 31(5): 188-193.
[22] 孙庆龄, 李宝林, 许丽丽, 张涛, 葛劲松, 李飞. 2000-2013 年三江源植被 NDVI 变化趋势及影响因素分析. 地球信息科学学报, 2016, 18(12): 1707-1716.
[23] 成方妍, 刘世梁, 尹艺洁, 吕一河, 安南南, 刘昕明. 基于 MODIS NDVI 的广西沿海植被动态及其主要驱动因素. 生态学报, 2017, 37(3): 788-797.
[24] 刘静, 银山, 张国盛, 王林和, 李禾, 斯琴高娃. 毛乌素沙地 17 年间植被覆盖度变化的遥感监测. 干旱区资源与环境, 2009, 23(7): 162-167.
[25] 周淑琴, 荆耀栋, 张青峰, 吴发启. 毛乌素沙地植被空间自相关分布模式及变化特征. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(2): 318-330.
[26] 王静璞, 刘连友, 贾凯, 田丽慧. 毛乌素沙地植被物候时空变化特征及其影响因素. 中国沙漠, 2015, 35(3): 624-631.
[27] 郑亚云. 榆林 NDVI 时空变化及驱动因子研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
[28] 刘登峰, 王心睿, 黄强, 孟宪萌, 林木. 毛乌素沙漠南部植被指数的变化规律研究. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 5-9.
[29] 榆林市统计局. 榆林概况. http://www.yltjj.gov.cn/1/1/list.aspx.
[30] 榆林市统计局. 2015 年榆林市国民经济和社会发展统计公报. (2016-08-23). http://www.yltjj.gov.cn/9/2795/content.aspx.
[31] 宋怡, 马明国. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的中国寒旱区植被动态及其与气候因子的关系. 遥感学报, 2008, 12(3): 499-505.
[32] Stow D, Daeschner S, Hope A, Douglas D, Petersen A, Myneni R, Zhou L, Oechel W. Variability of the seasonally integrated normalized difference vegetation index across the north slope of Alaska in the 1990s. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(5): 1111-1117.
[33] 詹道江, 徐向阳, 陈元芳. 工程水文学(第四版). 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 154-157.
[34] 中国统计数据库. 榆林统计年鉴 2015. https://www.shujuku.org/statistical-yearbook-of-yulin.html.